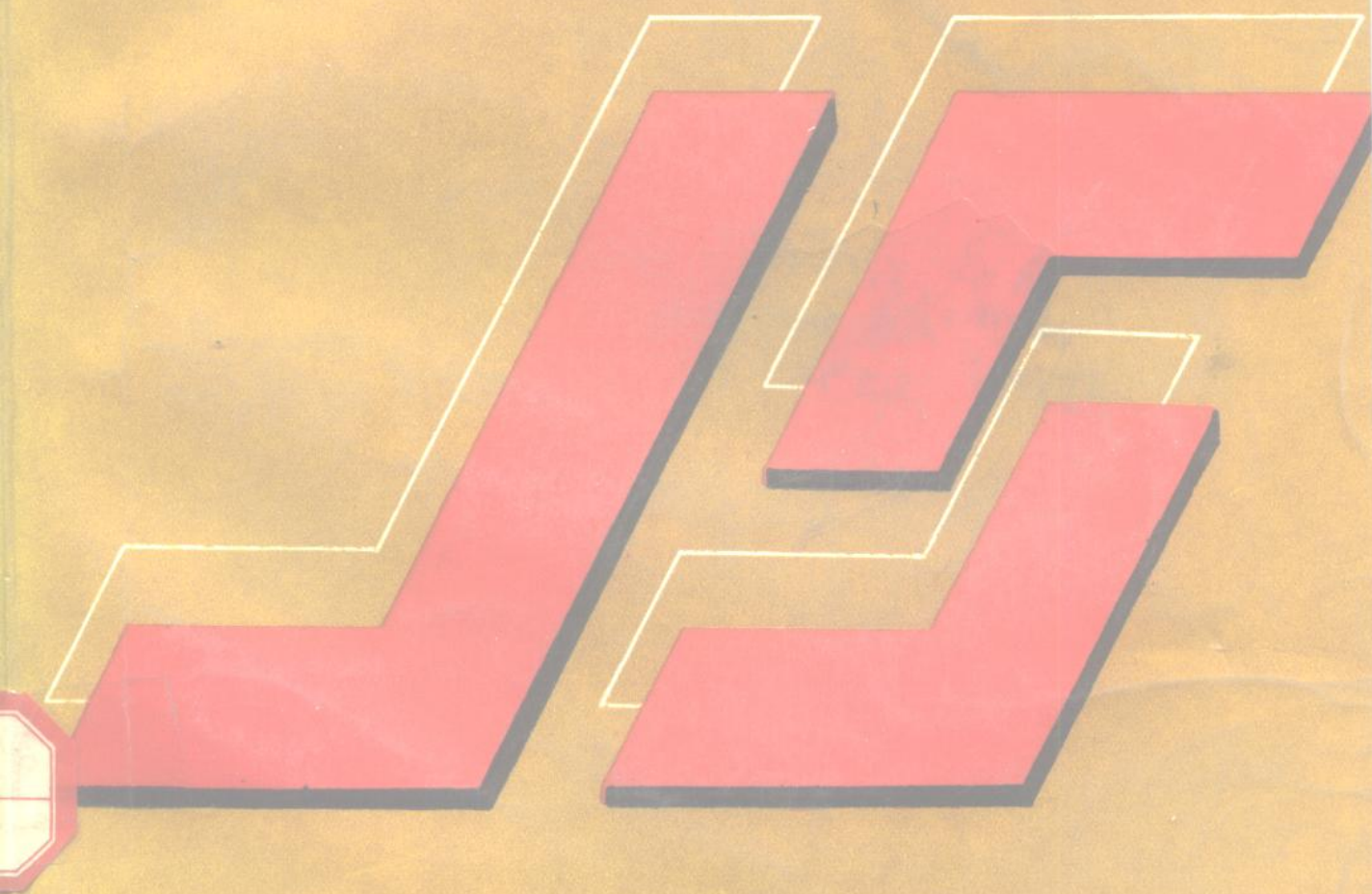


高等学校机械设计系列教材

机械设计

(机械类)

唐蓉城 陆玉 主编



机械工业出版社

7422
733

高等学校机械设计系列教材

机 械 设 计

(机 械 类)

主编 唐蓉城 陆 玉

参编 常觉民 王凤礼 佟延伟

杨景蕙 潘凤章 程福安

陈冠国

主审 ~~郭芝俊~~ ~~董阳照~~



机 械 工 业 出 版 社

(京)新登字054号

本书是根据1987年国家教育委员会批准印发的“机械设计(原机械零件)课程教学基本要求”编写的。

全书共分十八章,第一、二、三、十五章主要介绍设计概论、设计准则、疲劳强度设计、常用材料与制造工艺、摩擦磨损和润滑等;其它各章分别介绍联接、弹簧、带、链、齿轮、蜗杆传动,以及轴、轴承、联轴器、离合器和制动器等的选择与设计计算。

本书主要作为高等工科院校机械类各专业的适用教材,也可作为成人高等院校机械类各专业的适用教材,同时还可供其他专业的师生和广大工程技术人员参考。

机 械 设 计

(机 械 类)

唐蓉城 陆 玉 主编

*

责任编辑:王世刚 钱飒飒 版式设计:朱淑珍

封面设计:肖 晴

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

河北省抚宁县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×10921/16·印张24 3/4·字数610千字

1993年5月北京第1版·1993年5月北京第1次印刷

印数 00 001—5 000 定价: 12.70元

ISBN 7-111-03671-9 / TH·433

机械设计系列教材编委会成员

主 任 董阳照

副主任 唐蓉城 陆 玉 白春林

秘 书 陆 玉(兼) 李国柱

委 员 (按姓氏笔划)

白春林 曲玉峰 刘俊龙

陆 玉 杜立杰 何在洲

李秀珍 杨景蕙 陈福生

唐蓉城 董阳照 钱寿铨

前 言

本书是天津大学和河北省机械设计教学研究会合编的机械设计系列教材之一。本系列教材有机械设计（机械类）、机械设计基础（近机类）、机械设计基础（非机类）、机械设计课程设计、机械设计习题集（与机械设计配套使用）五种。该系列教材是天津大学和河北省十余所高等学校多年来的教学经验总结。

本书符合1987年国家教委批准的教学基本要求。在编写过程中，注意在传统模式上作一定的改进。此书在一些主要章节增加了设计计算流程图，有利学生综合所学内容，同时也为开展计算机辅助教学打下基础。为了便于教与学，书中插图做了适当的更新。改变了传统的“概述”的写法，突出各零件的设计计算和结构设计，为扩宽学生的知识面适当增加了一些内容。对某些与先修课程有直接关联的内容，编写时不再重述，这样可促使学生温故知新，以达到学习的连贯性。凡涉及国家标准的内容，一律采用1991年底所颁布的标准。

参加本书编写的有唐蓉城（第一、七章和传动综述），常觉民（第二、十四章），王凤礼（第三、十七章），佟延伟（第四、九章），陆玉（第五、六、八章），杨景蕙（第十章），潘凤章、唐蓉城（第十一章），程福安（第十二、十三、十八章），陈冠国（第十五、十六章）。

全书由唐蓉城、陆玉主编，天津大学郭芝俊教授、河北工学院董阳照教授主审。唐山工程技术学院李国柱老师在本书出版印制过程中作了大量工作，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错误和不当之处希广大读者给予指正。

编 者

1992年8月

目 录

第一章 机械设计概论	1
第一节 机器和机械零件设计的基本程序和原则	(1)
第二节 机械设计的发展	(8)
第三节 机械设计课程介绍	(4)
第四节 机械设计计算准则	(4)
第二章 机械零件的疲劳强度设计	12
第一节 疲劳曲线和极限应力图	(12)
第二节 设计零件受单向稳定变应力时的疲劳强度与安全系数	(15)
第三节 设计零件受双向稳定变应力时的疲劳强度与安全系数	(19)
第四节 设计零件受非稳定变应力时的疲劳强度与安全系数	(21)
第五节 低周循环疲劳寿命计算	(24)
第六节 疲劳裂纹扩展寿命计算	(25)
附 录	(26)
第三章 机械零件常用材料及制造工艺性	34
第一节 机械零件常用材料和选择原则	(34)
第二节 零件截面的合理形状	(39)
第三节 机械零件的制造工艺性	(40)
第四章 弹簧	(46)
第一节 综述	(46)
第二节 圆柱形螺旋弹簧的计算	(52)
第三节 螺旋压缩、拉伸弹簧的计算	(58)
第四节 其它弹簧简介	(63)
第五章 螺纹联接及螺旋传动	69
第一节 螺纹	(69)
第二节 螺纹联接	(71)
第三节 单个螺栓联接的强度计算	(76)
第四节 螺栓组联接受力分析与计算	(84)
第五节 提高螺栓联接强度的措施	(89)
第六节 螺旋传动	(93)

第六章 键、花键和销联接	102
第一节 键联接	(102)
第二节 花键联接	(107)
第三节 销联接	(110)
第四节 成形联接	(112)
第七章 过盈联接	114
第一节 组成、性能和应用	(114)
第二节 过盈联接的装配方法	(114)
第三节 提高过盈联接承载能力的措施	(115)
第四节 圆柱面过盈联接的设计计算	(116)
第五节 圆锥面过盈联接的计算	(124)
第六节 弹性环联接	(125)
第八章 铆、焊、粘联接	(127)
第一节 铆接	(127)
第二节 焊接	(131)
第三节 粘接	(135)
传动综述	138
第九章 摩擦轮传动	140
第一节 综述	(140)
第二节 定传动比摩擦轮传动的计算	(143)
第三节 摩擦无级变速器简介	(148)
第十章 带传动	152
第一节 概述	(152)
第二节 带和带轮	(152)
第三节 带传动的受力分析及滑动	(157)
第四节 普通V带传动设计	(161)
第五节 带传动的张紧装置	(168)
第六节 其它带传动简介	(171)
第十一章 齿轮传动	173
第一节 综述	(173)
第二节 圆柱齿轮传动的载荷计算	(180)
第三节 直齿圆柱齿轮强度计算	(186)
第四节 斜齿圆柱齿轮强度计算	(204)

第五节	圆柱齿轮传动的几何计算.....	(209)	第十六章	滑动轴承.....	314
第六节	齿轮胶合承载能力计算.....	(212)	第一节	概述.....	(314)
第七节	直齿锥齿轮传动.....	(223)	第二节	滑动轴承的结构.....	(315)
第八节	齿轮传动的效率与润滑.....	(230)	第三节	滑动轴承的材料.....	(320)
第九节	齿轮结构.....	(232)	第四节	润滑材料和润滑方法.....	(322)
第十二章	蜗杆传动.....	236	第五节	滑动轴承的条件性计算.....	(327)
第一节	蜗杆传动综述.....	(236)	第六节	液体动力润滑径向轴承的 计算.....	(328)
第二节	普通蜗杆传动的主要参数与 几何尺寸.....	(240)	第七节	液体动力润滑推力轴承简 介.....	(340)
第三节	蜗杆传动的强度计算.....	(244)	第八节	静压轴承简介.....	(341)
第四节	普通圆柱蜗杆和蜗轮的结 构.....	(252)	第十七章	滚动轴承.....	343
第十三章	链传动.....	255	第一节	滚动轴承的构造、类型和 代号.....	(343)
第一节	链传动综述.....	(255)	第二节	滚动轴承的负荷分布和失效 形式.....	(349)
第二节	链传动的运动特性.....	(258)	第三节	滚动轴承的疲劳强度计算.....	(351)
第三节	滚子链传动的设计计算.....	(261)	第四节	滚动轴承的静负荷计算.....	(360)
第四节	链传动的合理布置和润滑.....	(266)	第五节	滚动轴承的极限转速.....	(361)
第五节	齿形链传动的计算简介.....	(268)	第六节	滚动轴承的组合设计.....	(364)
第十四章	轴.....	270	第七节	滚动轴承的润滑和密封.....	(370)
第一节	综述.....	(270)	第十八章	联轴器、离合器和制 动器.....	373
第二节	轴的结构设计.....	(275)	第一节	联轴器的分类及性能特点.....	(373)
第三节	轴的强度计算.....	(278)	第二节	几种常用的联轴器.....	(373)
第四节	轴的刚度计算.....	(287)	第三节	离合器.....	(381)
第五节	轴的振动与临界转速.....	(291)	第四节	制动器.....	(385)
第十五章	摩擦、磨损和润滑.....	295	参考文献.....		(360)
第一节	摩擦.....	(295)			
第二节	磨损.....	(300)			
第三节	润滑.....	(305)			
第四节	流体动力润滑的基本原理.....	(312)			

第一章 机械设计概论

第一节 机器和机械零件设计的基本程序和原则

机器是人类利用外力减轻体力劳动和提高生产率的工具。机器的发展经历了一个由简单到复杂的漫长过程。人类在生产和生活中使用机器的水平，是衡量社会生产力发达水平的重要标志。完整机器的形态，在蒸汽机出现后才逐步形成。现以机器的功能为基点，说明机器的组成，见图1-1。

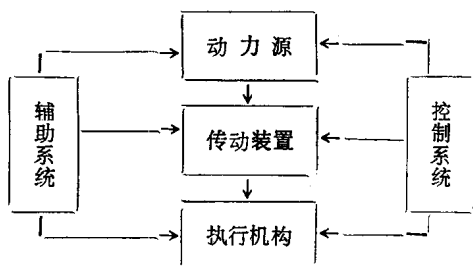


图1-1 机器的组成

机器设计的基本要求是实现预定功能、注意人一机协调、重视经济效益、突出安全可靠。

机器设计的基本程序，见图1-2。

机器设计常用的方法可归纳为三种：

内插式设计 借鉴现有的设计方案或成功的经验，通过少量的试验研究和技术改进设计出新的产品。内插式设计是设计一般机器的常用有效方法。

外推式设计 设计时虽有部分经验可以借鉴，但外推部分尚为未知领域，一旦某些设计参数超出通用设计的许用范围，有可能出现意想不到的后果。因此，对外推设计要进行必要的技术研究、理论探索和科学实验。

开发性设计 用新原理、新技术设计新的机器为为开发性设计。

机器设计是一项复杂、细致和科学的工作。要想提供功能好、质量高、成本低、竞争力强、市场广的新机器，就应逐步深化机器设计方法的综合研究。当今世界发达国家，正在深入开展“设计方法学”的研究。

机械零件是组成机器的基本单元，是影响机器性能质量的关键。机械零件设计的基本要求是工作可靠、工艺性好和成本低廉。机械零件设计的基本程序，见图1-3。

机械零件设计分为设计计算和校核计算。设计计算是根据零件的工作情况和工作能力准则（将在后面讨论）确定安全条件，用计算方法求得零件的主要几何尺寸，然后再按工艺要求和尺寸协调进行结构设计。校核计算是已知零件的主要几何参数、图纸和经验数据，初步拟定零件的结构尺寸，然后再按工作能力准则进行校核验算。无论是设计计算和校核计算，一般均应对某些复杂的物理现象做出适当的简化，如以集中力代替实际的分布力，以支承点代替支承面等，所以机械零件设计计算总带有一定的条件性。为使计算结果更加实际化，应多参考已有的成功设计和在实际应用中累积的统计资料。设计工作是一个综合的反复实践过程，要经过多次循环修改设计方案和设计参数，才能获得比较合理的设计，这个过程实质上也是一个逐步的宏观优化过程。

近年发展的“优化设计”“可靠性设计”“有限元设计”“疲劳设计”“模块设计”

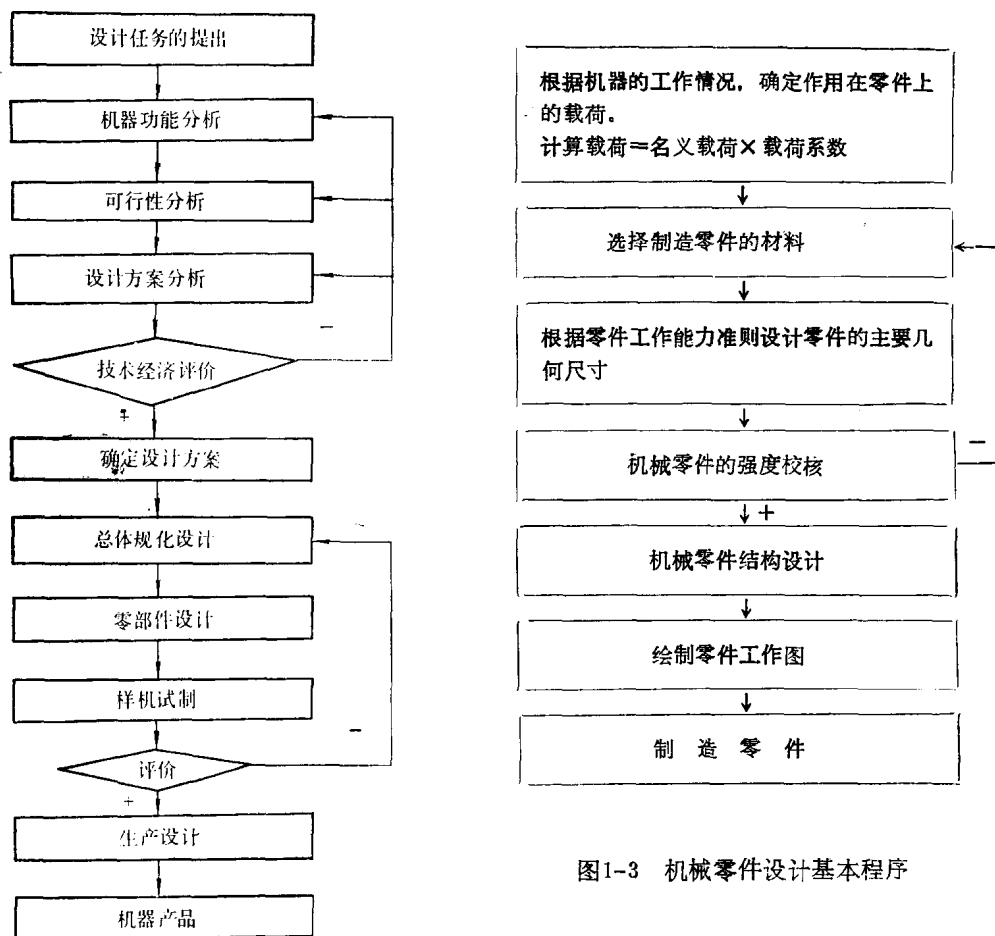


图1-3 机械零件设计基本程序

图 1-2 机器设计基本程序

“反求工程设计”“线外设计”“CAD”“智能设计”“动态设计”“设计方法学”等现代设计方法，已在机械设计中获得应用，这是推动机械设计向综合化、科学化方向发展的新里程。

在不同类型、不同规格、不同用途的各种机器中，有许多零件是相同的。将这些零件按照尺寸、结构、材料、检验等要求加以标准化、系列化和通用化，使之成为设计者共同遵守的准则。标准化、系列化、通用化，对机械设计有着十分重要实际价值。在机械设计中贯彻“三化”的重要意义为：

1. 简化设计工作、缩短设计周期，以便设计人员将主要精力用于关键零部件的设计。
2. 标准化零件便于由专门工厂采用先进技术组织大规模的集中生产，有利于提高生产率、合理使用材料、确保质量降低成本和增加经济效益。
3. “三化”零部件具有很大的互换性，可以大大简化机器设备的维修工作。
4. 便于改进、提高和增加新的品种。

我国现行标准分有：国家标准（GB）、部颁标准和行业标准。出口产品则应采用国际标准（ISO）。

第二节 机械设计的发展

20世纪后期科学技术的进步日新月异,同时也给机械设计学科注入新的生命力。机械设计学科正在冲破传统的设计方法,沿着更科学、更完善的道路飞跃前进,这将加快机械设计学科从“自由王国”向“必然王国”的过渡。当今机械设计学科发展进步表现为:

1.深化理论研究 机械设计学科过去往往从宏观概念研究问题,现在已向微观概念方向发展。如摩擦学、断裂力学、弹性流体动力学等研究,均在进一步揭开机械零件、部件、结构的承载机理方面做了大量研究工作。

2.由静态步入动态 传统的机械设计以局部的静态设计为基础,现在向着以综合或整体系统为对象的动态设计方向发展。

3.新的设计方法不断出现 在机械设计中不断采用新的设计方法,使产品设计更加科学化,缩短了产品更新周期,扩大了产品的市场,提高了产品的市场竞争力。

4.计算精度高、计算速度快 电子计算机的出现,将机械设计科学的水平推向一个新的阶段。在机械设计中,用电子计算机可完成程序设计、工程制图、建立数据库和程序库等复杂工作。开拓了机械设计者分析问题、综合问题和解决问题的视野。这些工作统称计算机辅助设计。

机械设计者是完成机械产品设计任务的核心,要求设计者必需跟上科学技术发展的步伐,这样才能有效地进行设计工作。显然,设计对设计者来说是难能得到满足的工作。设计者的职业特征,是由各种知识和专业能力组合而成的综合表现。因此,培养一个合格的设计人员,并使之达到成熟,要经历一个长期的、艰苦的实践过程。设计者应具备的基本条件如下:

1) 要具备理论分析、生产实践和观察思考的能力。设计者具备渊博的理论知识,是搞好设计理论分析的基础;生产实践知识是对设计质量的有利保证;观察思考是发现问题和提出问题的渊源。

2) 要有创新和改革的意识。设计者要不断进行创造性思维能力的锻炼;提高捕捉新动态(科技动态、产品动态、市场动态等)的能力。设计者在社会实践中,应在提炼设计问题、制定技术方案、规划功能作用、分析工作原理、构思设计结构,评价设计成果等诸方面,不断开拓设计思维运动。

3) 要有不断进取的精神。设计者要不断积累信息、扩宽知识、勤于归纳、善于分析,从中预测未来的发展趋向。

4) 要有良好的思想修养。设计是将各种各样的工作活动结合成一体的系统过程,因此要求设计者具有高度的责任心和团结协作精神。同时还要求设计者有牢固的法制观念,严格遵守国家颁布的各种设计法规。

设计者是人类需要和科学成果之间的一座桥梁。要求设计者不断总结经验,学习新的科学知识,为提高设计水平而努力。

第三节 机械设计课程介绍

一、定义几个名词

1. 机器 执行机械运动的装置，用来转换和传递能量、物料和信息。
2. 机械 机器和机构的总称。
3. 零件 组成机械的不可拆的基本单元。它分为通用零件(各种机器中经常使用的零件)，如螺钉、齿轮、轴等和专用零件(只在一定类型机器中使用的零件)，如曲轴、纺锭、织梭等。
4. 部件 为完成同一使命在结构上组合在一起，并协同工作的零件总体。如滚动轴承、联轴器等。
5. 机械零件 泛指零件和部件。

二、课程性质

机械设计课程是机械工程类专业学生应着重学习的一门主干技术基础课。它综合运用理论力学、材料力学、机械原理、金属工学、金属学和热处理、公差技术测量、机械制图等先修课的知识，进行机械设计学科的基本训练，并为学生进一步学习专业课程打下基础。该课程是工程教育中的重要环节。

三、课程任务

设计是为了满足某一特定要求而进行的创造性活动。接受工程教育的学生，掌握设计基本理论和基本方法是应具备的基本能力。机械设计课程，可以培养学生应用新原理、新概念，完成机械设计能力的基础训练。同时培养学生初步树立正确的设计思想，了解国家的技术经济政策。

四、课程内容

机械零件的设计和计算，是本课程的基本内容。最终目的是要求学生综合运用各种机械零件和各种机构，以及其它先修课的知识，独立完成机械传动装置和简单机械的设计。

机械设计是生产机械产品的第一道工序，设计质量的优劣，直接影响产品质量和经济效益。因此，机械设计学科对国民经济的发展具有重要意义。

第四节 机械设计计算准则

机械零件的设计和计算是本课程的基本内容，机械零件的失效是设计计算的依据（计算准则）。何谓失效？即机械零件丧失工作能力或达不到设计所要求的性能称为失效。失效不仅意味着破坏，失效有破坏性失效（断裂）和非破坏性失效（如刚度不足）两类。机械零件的失效形式很多，归纳起来有下列几个方面。即强度、刚度、耐磨性、振动稳定性、温度、可靠性等方面的问题。

为了避免机械零件失效，应使零件具有足够的工作能力。所谓工作能力，即机械零件不发生失效时的安全工作限度（对载荷而言的工作能力称为承载能力）。衡量机械零件工作能力的准则，随零件失效形式的不同而不同。以轴为例，它的失效可能是疲劳断裂，也可能是

过大的弹性变形。对于前者，轴的工作能力取决于轴的疲劳强度；对于后者，则取决于轴的刚度。下面分别阐述考虑这些问题的计算准则。

一、强度准则

机器运转时，机器中的各个零件将承受载荷，如果强度不够，零件将出现失效。显然，保证所设计的零件有足够的强度，是保证机器正常运转的根本条件。强度准则是指在机械零件中，由载荷引起的应力不应超过允许的限度。

常用的判断零件强度的方法有两种，一是判断零件危险剖面处的最大应力（ σ 、 τ ）是否小于许用应力（ $[\sigma]$ 、 $[\tau]$ ）。其判断条件（强度条件）为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &\leq [\sigma], \tau \leq [\tau] \\ \text{而} \quad [\sigma] &= \frac{\sigma_{lim}}{[S]_{\sigma}}, \quad [\tau] = \frac{\tau_{lim}}{[S]_{\tau}} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 σ_{lim} 、 τ_{lim} ——分别为极限正应力和切应力；

$[S]_{\sigma}$ 、 $[S]_{\tau}$ ——分别为正应力和切应力时的许用安全系数。

另一种方法是判断零件危险剖面处的实际安全系数（ S_{σ} 、 S_{τ} ）是否大于许用安全系数（ $[S]_{\sigma}$ 、 $[S]_{\tau}$ ）。其判别条件为

$$\left. \begin{aligned} S_{\sigma} &= \frac{\sigma_{lim}}{\sigma} \geq [S]_{\sigma} \\ S_{\tau} &= \frac{\tau_{lim}}{\tau} \geq [S]_{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

1. 载荷和应力 载荷按照随时间变化的特性分为静载荷和变载荷。不随时间变化或变化缓慢的载荷为静载荷，如零件自重、装配螺栓的拧紧力、静水压力等。随时间作周期性变化或非周期性变化的载荷为变载荷，前者如活塞式水泵的活塞所受的载荷，后者如机车、拖拉机、汽车等行驶部分的零件所受的载荷。非周期性变化的载荷可用统计规律来表征。

与载荷相对应，应力分为静应力和变应力（图1-4）。静应力只能在静载荷作用下产生；

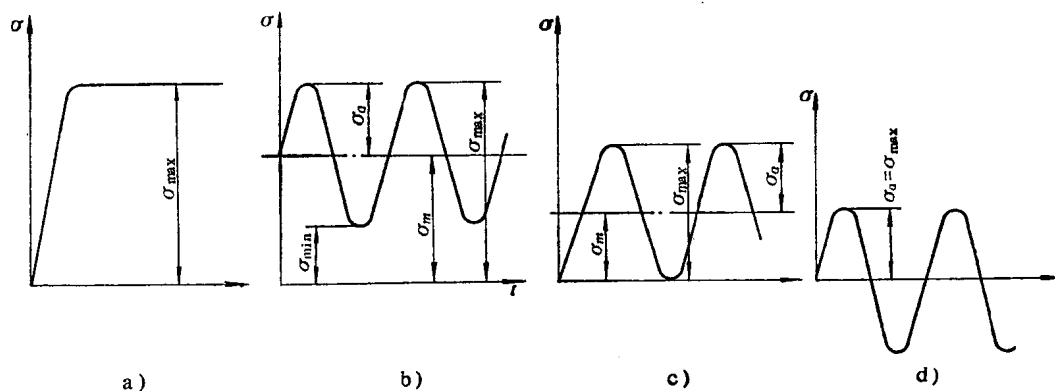


图1-4 应力的分类

a) 静应力 b) 非对称循环变应力 c) 脉动循环变应力 d) 对称循环变应力

变应力由变载荷产生，也可由静载荷产生，例如转轴在静载荷作用下转动时，剖面上将产生变应力；滚动轴承在静载荷作用下工作时，轴承的内、外圈和滚动体均产生变应力。

变应力又可分为：非对称循环变应力、脉动循环变应力和对称循环变应力。由图1-4可知，变应力各应力参数之间的关系为

非对称循环变应力

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——最大应力；

$\sigma_{\min}$ ——最小应力；

σ_m ——平均应力；

σ_a ——应力幅；

r ——应力比；

脉动循环变应力

$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}, \quad \sigma_{\min} = 0, \quad r = 0$$

对称循环变应力

$$\sigma_m = 1, \quad \sigma_a = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}, \quad r = -1$$

静应力可视为变应力的特例，其 $\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ ， $r = +1$

2. 静应力下的强度 零件在静应力条件下工作，其失效形式为断裂或塑性变形。

(1) 在简单应力条件下工作的塑性材料零件，应按照不发生塑性变形的条件进行强度计算。此时取材料的屈服点 (σ_s 、 τ_s) 为极限应力。其强度条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_s}{[S]_\sigma} \leq [\sigma], \quad \tau = \frac{\tau_s}{[S]_\tau} \geq [\tau] \\ S_\sigma &= \frac{\sigma_s}{\sigma} \geq [S]_\sigma, \quad S_\tau = \frac{\tau_s}{\tau} \leq [S]_\tau \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

(2) 在复合应力下工作的塑性材料零件，可按第三或第四强度理论确定其强度条件。

对于弯扭复合应力，可采用第三强度理论确定其强度条件。即

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_w^2 + 4\tau_r^2} \leq [\sigma] \\ S &= \frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_w^2 + 4\tau_r^2}} \geq [S] \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中 S 、 $[S]$ ——复合应力时的实际安全系数和许用安全系数；

σ_w ——弯曲应力；

τ_r ——切应力。

近似取 $\sigma_s/\tau_s = 2$ 时，可得安全系数计算式为

$$S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \quad (1-5)$$

由于塑性材料组织比较均匀，零件绝对尺寸和应力集中系数影响不大，计算时可不予以考虑，故许用安全系数 $[S]_\sigma$ 、 $[S]_\tau$ 、 $[S]$ 均取为 1.5~2。

(3) 在简单静应力下工作的脆性材料, 应按不发生断裂的条件进行强度计算。此时取材料的强度极限 (σ_b 、 τ_b) 为极限应力。其强度条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_b}{[S]_\sigma} \leq [\sigma], \quad \tau = \frac{\tau_b}{[S]_\tau} \leq [\tau] \\ S_\sigma &= \frac{\sigma_b}{\sigma} \geq [S]_\sigma, \quad S_\tau = \frac{\tau_b}{\tau} \geq [S]_\tau \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

(4) 在弯、扭复合应力下工作的脆性材料零件, 其强度条件由第一强度理论确定。即

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{2} \left[\sigma_\sigma + \sqrt{\sigma_\sigma^2 + 4\tau_\tau^2} \right] \leq [\sigma] \\ S &= \frac{2\sigma_b}{\sigma_\sigma + \sqrt{\sigma_\sigma^2 + 4\tau_\tau^2}} \geq [S] \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

对组织不均匀的脆性材料 (如灰铸铁) 由于材料内部不均匀引起的应力集中, 远远大于零件形状和机械加工等所引起的应力集中, 后者对零件强度无显著影响, 计算时可不考虑。对组织均匀的低塑性材料 (如低温回火的高强度钢), 计算时应考虑应力集中的影响。故许用安全系数 $[S]_\sigma$ 、 $[S]_\tau$ 、 $[S]$ 均取值为 3~9, 小值用于无应力集中的情况。

3. 变应力下的强度 在变应力作用下, 零件的失效将是疲劳破坏。变应力的极限应力为疲劳极限 σ_{rN} 。即应力比 r 一定时, 应力循环 N 次后, 材料不发生疲劳破坏时的最大应力。变应力时的疲劳强度计算详见第二章。

4. 机械零件的表面接触强度 高副零件工作时, 载荷是通过线接触 (如渐开线齿廓相接触) 或点接触 (如滚动轴承的滚动体 (球) 与内、外圈相接触) 来传递的。由于接触部位的弹性变形, 实际是由很小的接触面积来传递载荷。两接触体受载运转时, 接触部位是周期性接触, 所以接触应力是随时间变化的变应力, 出现的失效为表面疲劳破坏, 称为表面疲劳磨损 (疲劳点蚀)。其强度条件为:

两球体相接触 (图1-5)

$$\sigma_H = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{6F \left(\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right)^2} \leq [\sigma]_H \quad (1-8)$$

当 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ 、 $E_1 = E_2 = E$ 时

$$\sigma_H = 0.388 \sqrt[3]{\frac{FE^2}{\rho^2}} \leq [\sigma]_H \quad (1-9)$$

两圆柱体相接触 (图1-6)

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F}{\pi L} \left(\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right)} \leq [\sigma]_H \quad (1-10)$$

当 $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ 、 $E_1 = E_2 = E$ 时

$$\sigma_H = 0.418 \sqrt{\frac{FE}{L\rho}} \leq [\sigma]_H \quad (1-11)$$

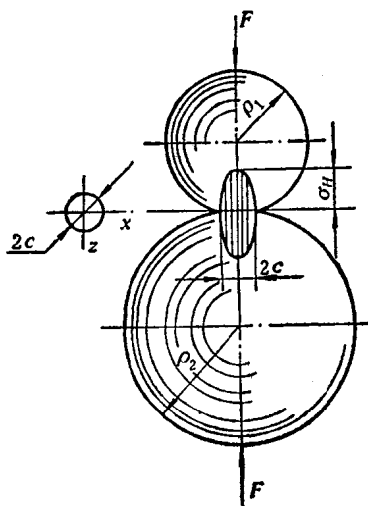


图1-5 两球体接触

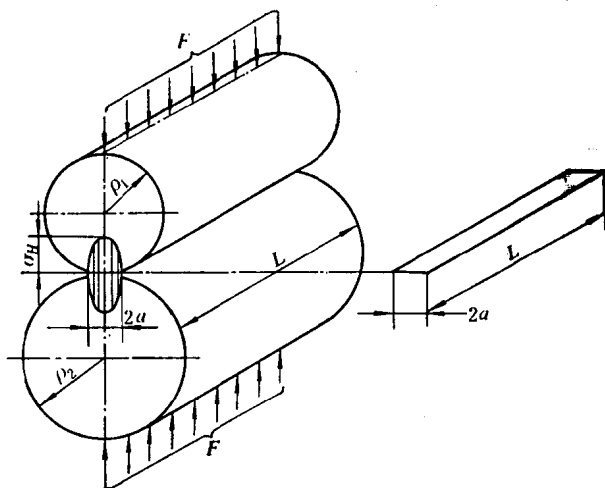


图1-6 两圆柱体接触

式中 ρ ——综合曲率半径 (mm), $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}$, 正号用于外接触, 负号用于内接触。

平面和圆柱体或球体相接触时, 平面的曲率半径 $\rho_2 = \infty$;

E ——综合弹性模量, $E = 2E_1E_2/(E_1 + E_2)$, E_1 、 E_2 为两接触体材料的弹性模量 (MPa);

L ——接触宽度 (mm);

μ_1 、 μ_2 ——两接触体材料的泊松比;

$[\sigma]_H$ ——许用接触应力 (MPa);

σ_H ——实际接触应力 (MPa)。

提高接触表面的硬度、改善表面加工质量、增大接触表面的综合曲率半径, 均能提高接触疲劳强度。

二、刚度准则

刚度是指机械零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力, 大多数零件在工作时应有足够的刚度, 如机床主轴刚度不足, 将影响被加工零件的精度。刚度有时又是保证强度的重要条件, 如受压长杆的刚度不足, 将影响其受压稳定性。刚度也会影响零件的自振频率, 刚度小自振频率低, 刚度大自振频率高, 所以说刚度是影响振动稳定性的主要因素。

零件在载荷作用下所产生的弹性变形量, 小于或等于机器工作性能所允许的极限变形量 (许用变形量), 即为刚度条件

$$y \leq [y] \quad (1-12)$$

式中 y ——实际变形量, 可由各种求变形量的理论或实验方法确定。它分为拉压变形 Δl 、挠度 f 、转角 θ 、扭角 φ (图1-7)。

$[y]$ ——许用变形量, 根据不同的工况由理论或经验确定其合理的数值。

由刚度计算所得零件剖面尺寸, 一般要比由强度计算的大, 所以满足刚度的零件往往也能同时满足强度要求。对于尺寸较大的零件, 当满足刚度要求时, 强度可能不够。

零件材料的弹性模量愈大, 零件的刚度愈大, 采用弹性模量大的材料制造零件, 可提高

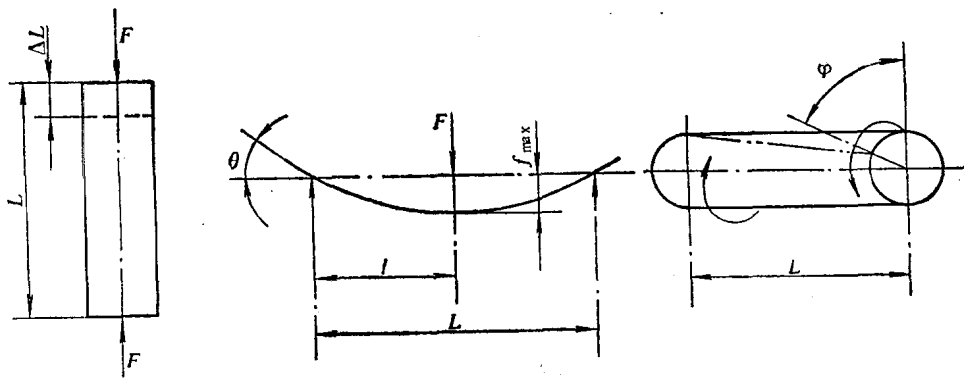


图1-7 变形型式

a) 拉压 b) 弯曲 c) 扭转

零件的刚度。应当注意的是，碳钢与合金钢的弹性模量相差不大，在尺寸相同的条件下，为提高零件的刚度而采用合金钢意义不大。

减小力臂和支点距离、增加辅助支承、选择合理的剖面形状（如中空剖面）、采用加强肋等都能提高零件的刚度。

三、振动稳定性准则

零件发生周期性弹性变形的现象称为振动。当作用在零件上的周期性外力的变化频率，与零件本身的自振频率相等时便产生共振。共振时振幅急剧加大，致使零件破坏机器工作失常。这种现象称之为“失去振动稳定性”。

引起零件振动的周期性外力有：往复运动零件产生的惯性力、摆动零件产生的惯性力矩、转动零件的不平衡质量引起的离心力，还有周期性作用的外力等。

振动稳定性的计算准则是：在设计时应使机器中受激振作用的各个零件的自振频率，与外力作用的频率（激振源的频率）不相等。通常应保证如下条件

$$0.85f > f_0 \quad \text{或} \quad 1.15f < f_0 \quad (1-13)$$

式中 f ——零件的自振频率；

f_0 ——外力作用的频率。

因外力作用的频率 f_0 ，取决于工作转速和往复行程数，通常 f_0 为不变的数。因此，当式（1-13）的条件不能满足时，只能用改变零件和系统的刚性、改变支承位置、增加或减少辅助支承等方法，来改变零件的自振频率 f ，以避免发生共振。

采用对称结构、减少悬臂长度、对转动零件进行平衡、利用阻尼消耗引起振动的能量、增加隔振元件防止振动传播、用阻尼器减弱冲击等，均能改善零件的振动稳定性。

四、可靠性准则

经过正确设计的零件，因其材料强度、加工精度、外载荷等均存在离散性，有可能出现早期的意外失效。这样的偶然情况一旦发生，便将造成很大的损失。在设计时应把这种偶然情况的概率限制在一定限度之内，即对零件应提出可靠性要求。

一批零件（其件数为 N ）在规定使用条件和规定时间 t 内进行试验，有 N_t 个零件偶然失效，其余 $N - N_t$ 个零件仍能继续工作，则此种零件的可靠度 R_t 为

$$R_t = \frac{N_t}{N} = \frac{N - N_f}{N} = 1 - \frac{N_f}{N} \quad (1-14)$$

不可靠度（即失效视率）为

$$F_t = \frac{N_f}{N} = 1 - R_t \quad (1-15)$$

可靠度与不可靠度之和等于1，即

$$R_t + F_t = 1 \quad (1-16)$$

随着试验时间的加长，能正常工作的件数 N_t 也在减小，可靠度也在改变。即，零件可靠度本身是时间的函数。假如时间 $t \rightarrow t + dt$ 间隔中，零件又有 dN_t 件发生破坏，则在 dt 时间间隔内的失效率 $f(t)$ 为

$$f(t) = \lambda = \frac{-\frac{dN_t}{dt}}{N_t}$$

将其积分得

$$-\int_0^t \lambda dt = \int_{N_0}^{N_t} \frac{dN_t}{N} = \ln \frac{N_t}{N} = \ln R$$

则

$$R = e^{-\int_0^t \lambda dt} \quad (1-17)$$

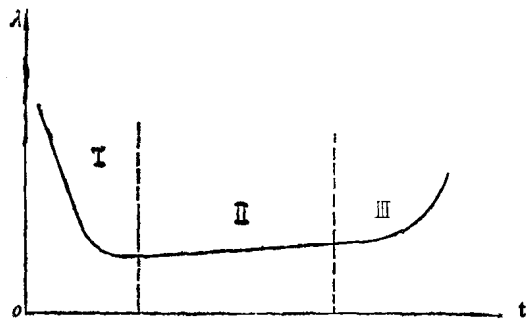


图1-8 失效率曲线

零件（或部件）的失效率 $\lambda = f(t)$ 与时间 t 的关系，如图1-8所示。该图之曲线习惯称之为浴盆曲线，曲线分三段。即Ⅰ段表示早期失效阶段，在此段失效率由很高急剧下降到某一稳定值。Ⅱ段表示正常使用阶段，在此阶段所发生的失效，多是由偶然因素造成的，因其发生的随机性，失效率为常数，此阶段愈长，零件的有效寿命愈长。Ⅲ段表示损坏阶段，零件长期工作将发生磨损、疲劳裂纹扩展等，致使失效率急剧增加。良好的维护保养、及时更换即将破坏的零件，可延缓机器进入这一阶段的时间，延长有效寿命。

可用两次失效间的平均工作时间MTBF (Mean Time Between Failures) 表征失效率。即

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad (1-18)$$

为保证零件具有所需的可靠度 R ，应对零件进行可靠性设计（参阅有关资料）。

提高可靠性的方法有：

- 1) 力求零件数量少、结构简单、传动链短、联接可靠。
- 2) 选用可靠度高的标准件。
- 3) 避免采用维护和操作误结构。
- 4) 规定合理的维修时间。
- 5) 增加必要的备用系统、设立监测系统。
- 6) 增加过载保护装置和自动停机装置。

五、温度对零件工作能力的影响

机器中常用矿物油作润滑剂，它的有效温度范围通常为 $-30 \sim 100^\circ\text{C}$ 。温度太低润滑油受